

Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos.

Mateus Barancelli Schwedersky¹; Jair Carlos Dutra²

^{1,2}Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

¹baranceli@labsolda.ufsc.br; ²jdutra@labsolda.ufsc.br.

Resumo:

O processo TIG, em configurações tradicionais, apresenta problemas quando utilizado de maneira autógena com elevadas corrente e velocidade de soldagem. Nessa condição normalmente ocorrem defeitos no cordão, principalmente descontinuidades denominadas *humping*.

Em estudo realizado no LABSOLDA, foram obtidas soldas de excelente qualidade com o processo TIG atingindo velocidades de 1,5 m/min. Essa soldagem utilizando na proteção misturas argônio-hidrogênio possibilitou velocidade semelhante ao processo MIG/MAG convencional, com a vantagem de ser realizada sem material de adição.

O presente trabalho tem o objetivo de fornecer subsídios para uma nova análise da formação dos defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade, já que a teoria baseada na pressão do arco não contempla totalmente o que tem sido observado na prática. Foram realizados ensaios com diferentes correntes utilizando argônio, hélio e misturas argônio-hidrogênio.

Os resultados mostram que para a mesma corrente média, à medida que a quantidade de H₂ foi aumentada, ocorreram também gradativos aumentos da potência, área fundida e eficiência de fusão. Existem fortes indícios que o mecanismo de formação de defeitos não depende somente da pressão do arco, mas sim do balanço entre pressão do arco e quantidade de metal fundido, que é dependente da eficiência de fusão proporcionada pelo gás utilizado.

Palavras-chave: Soldagem de elevada produtividade, TIG, *Humping*, Gases de proteção, Hidrogênio.

Abstract: *Under usual configurations, the TIG process presents problems when used as autogenously with high current and welding speed. In this condition defects in the weld bead usually occur, especially discontinuities called humping.*

In a study conducted at LABSOLDA, welds with excellent quality were obtained using the TIG process reaching speeds of 1.5 m/min. Under argon-hydrogen shielding gas mixtures welding speed similar to the conventional MIG/MAG process was allowed, with the advantage of being performed without filler material.

The objective of this paper is to provide support for a new analysis of the defects formation in high productivity TIG welding, since the theory based on the arc pressure does not fully contemplate what has been observed in practice. In this work, tests were performed with different currents using argon, helium and argon-hydrogen mixtures.

The results show that for the same average current, as the amount of H₂ was increased, there were also gradual increases in power, melted area and melting efficiency. There are strong indications that the mechanism of defects formation depends not only on the arc pressure, but on the balance between arc pressure and the quantity of molten metal, which depend on the melting efficiency provided by the used gas.

Key-words: *High productivity welding, TIG, Humping, Shielding gas, Hydrogen.*

1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, as indústrias têm buscado incessantemente maneiras de oferecerem produtos de melhor qualidade pelo menor valor para se manterem competitivas no cada vez mais concorrido mercado mundial. Os processos de soldagem em diversos casos significam boa parte dos custos de fabricação de um produto, e por isso também devem ser alvos de constante melhoria.

Devido à maciça mecanização e robotização dos processos de fabricação industriais, é cada vez maior a busca por processos de soldagem que também possibilitem elevada velocidade de soldagem. Além disso, existe também a tendência geral de redução da utilização das matérias primas, sendo que cada vez mais se buscam processos de soldagem que reduzam ou eliminem a utilização de material de adição.

Neste cenário de processos de elevada produtividade, o TIG autógeno está aquém de suas possibilidades de utilização, e é considerado um processo de soldagem de baixa velocidade. Porém, o desenvolvimento de técnicas

específicas pode viabilizar sua utilização em situações com velocidade de soldagem elevada, tornando-o competitivo com processos que utilizam material de adição e que são considerados os de maior produtividade, apresentando ainda redução de custos.

2. Antecedentes e Fundamentação Teórica

2.1 Introdução aos problemas no processo TIG

O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) é considerado tradicionalmente um processo utilizado com baixa velocidade de soldagem, e também por isso, classificado popularmente como de baixa produtividade. Essa classificação ocorre também devido aos problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG de forma autógena com velocidade de soldagem elevada, fazendo com que a corrente de soldagem necessária para manter o cordão com tamanho satisfatório também seja elevada.

O processo TIG se apresenta prontamente aplicável, proporcionando arco com boa estabilidade e sem ocorrência de problemas em uma faixa inicial de intensidade de correntes que na prática vai até cerca de 250 A. Dentro dessa faixa de correntes, que por sinal é onde está situada a maior parte das aplicações do processo dentro das indústrias, é possível aumentar a velocidade de soldagem de maneira quase proporcional ao aumento da corrente de soldagem. Nessa faixa de correntes baixas, a poça de fusão sob o arco, pode ser simplesmente considerada como uma poça de metal líquido, já que o arco não tem força para expulsar esse metal líquido. Porém, quando se busca velocidades de soldagem mais elevadas, na ordem de 1 m/min, torna-se necessário o aumento da corrente de soldagem. Com corrente de soldagem maior do que 250 A, o comportamento da poça de fusão muda, e o resultado na maioria das vezes é um cordão descontínuo. Essa descontinuidade, comumente é composta de regiões de crateras, e regiões de protuberâncias, de maneira alternada, com morfologia semelhante ao mostrado na Figura 1. Esse tipo de falta de continuidade do cordão de solda que ocorre quando se utilizam correntes e velocidades de soldagem elevadas, é chamado por alguns autores brasileiros de defeito em forma de “costas de dragão”, e é denominado “*humping*” nos trabalhos publicados internacionalmente. Assim, a falta de continuidade do cordão é o principal problema que restringe o uso do processo TIG em situações de elevada velocidade de soldagem, fazendo com que o processo seja considerado também como de baixa produtividade.

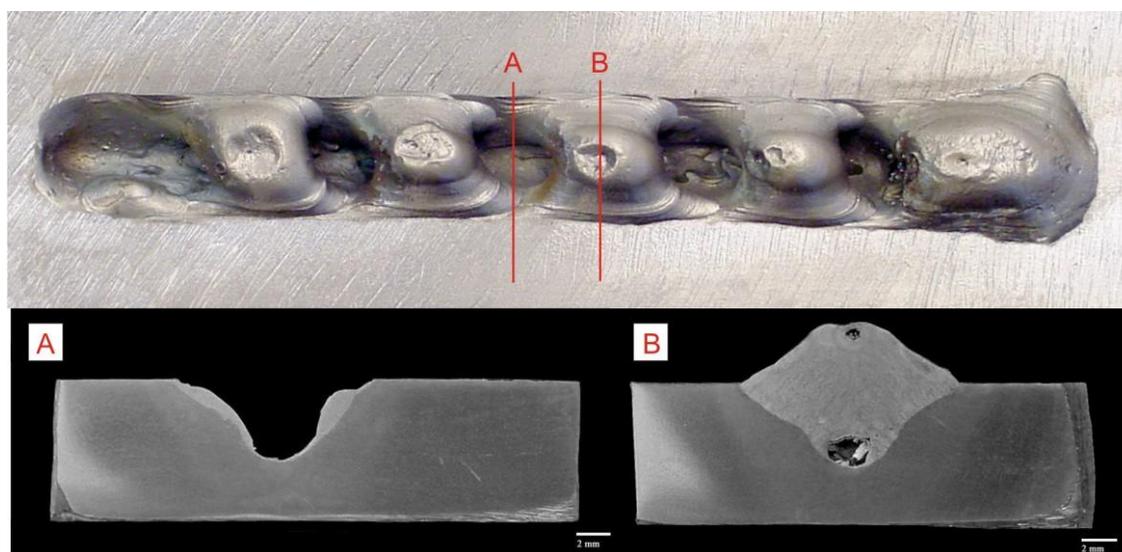


Figura 1 - Cordão soldado pelo processo TIG. A e B são seções transversais dos locais indicados na figura do cordão.

2.2 Mecanismo de formação de defeitos

A explicação que segue sobre a formação dos defeitos na soldagem de elevada produtividade, foi baseada nos trabalhos [1-3]. Em síntese, a poça de fusão da soldagem TIG em elevadas correntes adquire uma configuração semelhante à da Figura 2. Ao invés de formar uma poça metálica líquida sob o arco, como ocorre na soldagem TIG em baixas correntes, conforme a corrente de soldagem é aumentada a pressão do arco também aumenta, e com elevadas correntes a pressão do arco se torna suficientemente grande para empurrar o metal líquido para região posterior da poça de fusão, formando uma cratera sob o arco.

Segundo [1], o que irá determinar o aparecimento da cratera com posterior surgimento do *humping* conforme mostrado na Figura 2, será o resultado de um complexo balanço entre as forças que agem sobre a poça de fusão, sendo as consideradas mais importantes: Força resultante da pressão do arco (P_a): Pressão produzida pela ação do plasma contra a superfície da poça metálica; Forças hidrostáticas (P_h): São originadas pela pressão devido à coluna de metal líquido; Forças capilares (P_c): Devido ao ângulo de curvatura do metal líquido. A pressão do arco, tende a aumentar o tamanho da cratera, enquanto a pressão das forças hidrostáticas e capilares tendem a diminuir o tamanho da cratera formada, deslocando o ponto de transição para a região mais aquecida do arco.

De acordo com a combinação entre os parâmetros de soldagem, principalmente corrente de soldagem e velocidade de deslocamento da tocha, irão existir diferentes condições. Para situações de correntes mais baixas, existe a tendência de que as forças P_h e P_c sejam maiores do que P_a , e não ocorra o aparecimento da cratera. À medida que a corrente vai aumentando, P_a começa a se tornar maior do que as outras forças, e começa a existir a formação de cratera.

Conforme a tocha se movimenta na direção de soldagem, vai fundindo o metal que se encontra na frente do arco. Esse metal fundido é transportado para a região posterior da poça por uma fina camada de metal fundido que permanece em estado líquido no fundo e nas laterais da cratera. O metal fundido se acumula formando uma poça na região posterior do cordão, onde então se solidifica gradativamente conforme ocorre a movimentação da soldagem.

A interface entre o fundo da cratera e a poça de metal líquido é chamada ponto de transição. Com o aumento da velocidade de soldagem, toda a poça de fusão tende a ter um tamanho maior, afastando o ponto de transição e o centro do arco. O *humping* irá ocorrer quando a combinação de parâmetros colocarem a região de transição em uma posição onde o calor do arco não é mais suficiente para manter o metal líquido. Dessa forma, com a solidificação prematura dos canais ao redor da cratera, o metal que está sendo fundido não consegue chegar até a parte posterior da poça de fusão, e se acumula em um ponto formando uma protuberância deixando para trás uma região do cordão sem preenchimento. Ao longo da soldagem, esse comportamento ocorre ciclicamente, o cordão acaba resultando então em uma seqüência alternada de regiões de cratera e regiões de cordão com protuberâncias. Esse defeito é conhecido como *humping*.

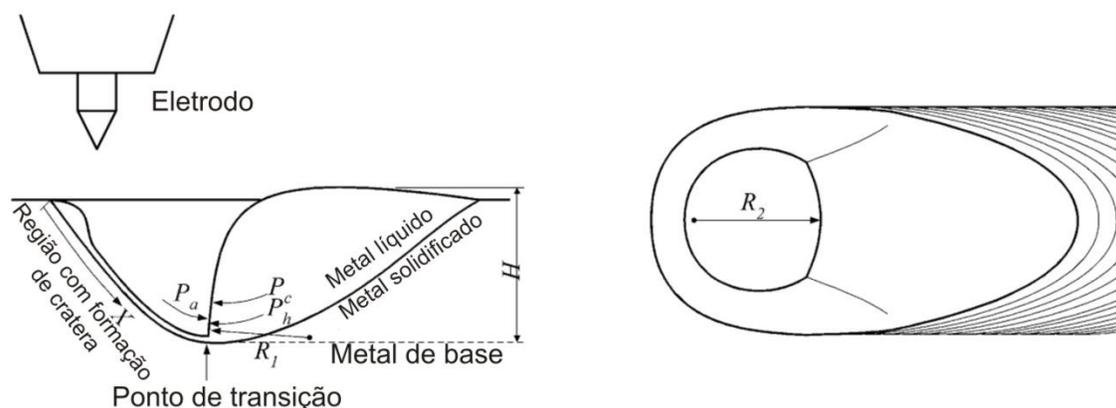


Figura 2 - Representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes [1].

2.3 Influência dos parâmetros de soldagem no aparecimento dos defeitos

O principal trabalho sobre a formação de defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade que mostra resultados práticos foi realizado por [4]. Esses autores realizaram uma série de ensaios tipo cordão sobre chapa determinando a velocidade limite acima da qual ocorre o aparecimento de defeitos para diferentes correntes e com gases de proteção argônio e hélio. Nestes ensaios foram realizadas medições da força que o arco exercia contra a chapa durante a soldagem. Apesar de ter sido realizado há cerca de 3 décadas, esse trabalho foi o único encontrado onde de fato houve um trabalho experimental extenso, mostrando a influência dos parâmetros de soldagem no aparecimento de defeitos, e tem sido utilizado até hoje como referência em todos os trabalhos que se seguiram sobre o assunto.

A velocidade limite para o aparecimento de defeitos diminui drasticamente com o aumento da corrente de soldagem. A Figura 3 (esquerda) mostra os resultados experimentais de [4], onde se observa a forte queda da velocidade limite para formação dos defeitos em função do aumento da corrente na soldagem TIG. Esses resultados caracterizam muito bem a dificuldade de obtenção de soldas com elevada produtividade no processo TIG, pois

supondo uma aplicação genérica quando se aumenta a velocidade de soldagem, é necessário também uma corrente de soldagem mais elevada para que seja possível fundir a quantidade de material desejada. Porém, o aumento da corrente irá diminuir a velocidade limite para formação de defeitos. Dessa forma, a obtenção de uma soldagem de elevada produtividade fica difícil, e por isso que o processo TIG tradicionalmente é utilizado com velocidade de soldagem baixa. Nota-se ainda, que a velocidade limite para o hélio seria cerca de três vezes superior em comparação com o argônio para a mesma corrente média. Pode-se destacar também que segundo os resultados de [4], a velocidade limite para formação dos defeitos no processo TIG diminui com o aumento da distância eletrodo-peça.

2.4 Efeito da força do arco no surgimento de defeitos

Os autores em [4] sugerem inicialmente que essa diferença drástica entre o limite de velocidade entre o Ar e o He seria explicada pela diferença entre a força que o arco exerce sob a superfície da poça de fusão em cada caso. Tentando esclarecer essa questão, eles realizaram medições da força total que o arco exerce contra o ânodo, em diferentes correntes de soldagem com os gases Ar e He, procurando resultados para fundamentar a teoria. Porém, as medições mostraram que para uma mesma corrente média a força para os dois casos é a mesma. Dessa forma, a explicação seria que no caso do Ar a força do arco estaria concentrada no eixo central do arco, enquanto para o He a força estaria distribuída em uma área maior, e por isso a pressão agindo sob a superfície da poça de fusão seria menor, retardando o processo de formação do *humping*. Essa explicação foi fundamentada na análise da geometria de penetração dos ensaios e também na observação do arco em cada situação, sendo que para o Ar pode-se observar uma coluna central mais brilhante, enquanto o arco com He apresenta luminosidade mais uniforme ao longo de todo o arco. Além disso, as medições de [4] mostraram que a força do arco aumenta com a diminuição da distância eletrodo-peça no processo TIG.

Os resultados de [4] serviram de referência para outros trabalhos que foram encontrados [1-3, 5-6] sobre a problemática da soldagem TIG de elevada produtividade. Os trabalhos [1-3, 6] compartilham da mesma explicação mostrada no item 2.2, onde a pressão do arco e a formação da cratera têm papel fundamental. Em [6] os autores mostram o gráfico da diferença de pressão dos arcos com argônio e com hélio, o qual está mostrado na Figura 3 (direita). Pode-se ver que a intensidade da pressão no centro do arco para o caso do Ar é muito maior em comparação com o He, sendo que essa distribuição de pressão mais aberta no caso do hélio é atribuída à sua menor densidade e maior viscosidade em elevadas temperaturas. Dessa forma, os autores em [5-6] afirmam que essa menor pressão efetiva para o caso do Hélio é o motivo para a grande diferença na velocidade limite para o aparecimento de defeitos entre He e Ar.

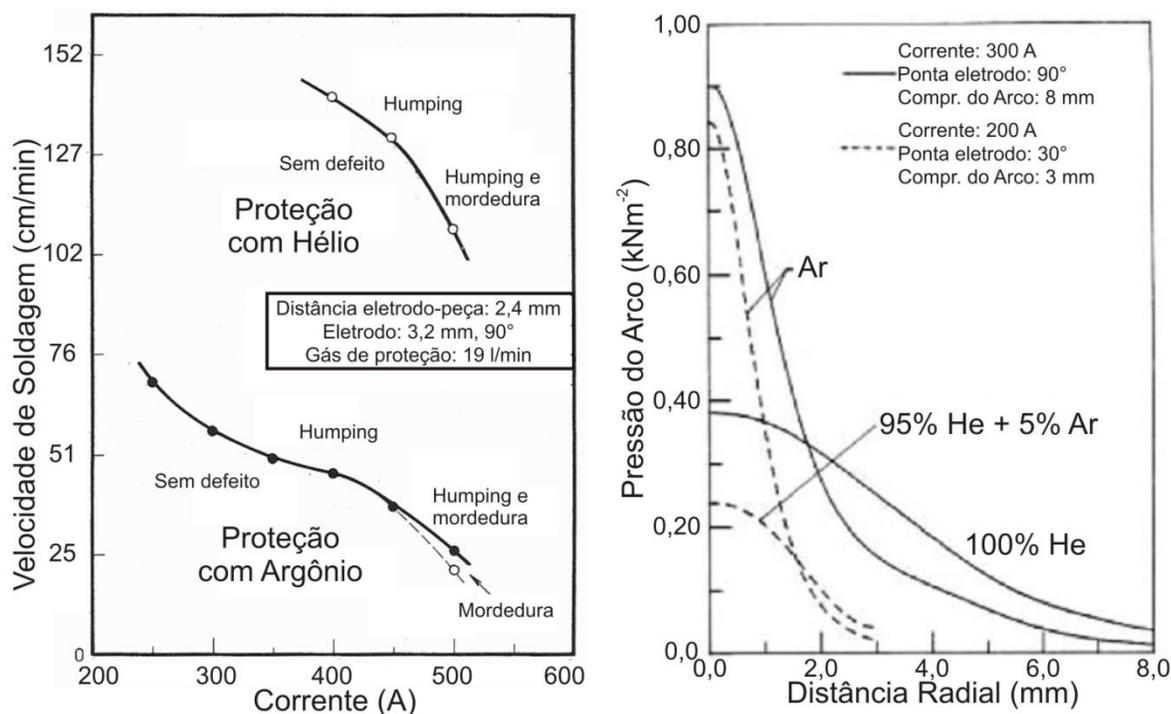


Figura 3 - Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos na soldagem TIG (esquerda) [4]. Efeito do gás de proteção na distribuição de pressão do arco durante a soldagem TIG (direita) [6].

2.5 Aplicação do hidrogênio na soldagem TIG

A aplicação do hidrogênio, ou de misturas gasosas que contenham frações de hidrogênio nos processos de soldagem a arco tem sido bastante restrita. A história da soldagem a arco mostra que o hidrogênio é um elemento que facilmente promove a formação de defeitos de soldagem como trincas e poros, especialmente no caso da soldagem dos aços. A formação de trincas induzidas por hidrogênio, certamente é o defeito mais famoso relacionado à presença de hidrogênio na soldagem a arco. As trincas ocorrem principalmente na zona termicamente afetada, sendo que diversos estudos sobre esse tipo de defeito foram realizados durante as últimas décadas. De maneira geral, os trabalhos encontrados sobre o assunto concordam que as trincas de hidrogênio ocorrem quando quatro situações ocorrem simultaneamente: hidrogênio presente no metal de solda, microestrutura susceptível (dura e frágil), elevadas tensões na região soldada, e temperaturas relativamente baixas (menores que 200°C). Segundo [7], a formação de porosidade devido ao hidrogênio ocorre, primeiramente devido à elevadas quantidades de H₂ presente durante a soldagem, porém também depende: da microestrutura do material, sendo que o H₂ possui maior solubilidade nos metais CFC do que nos CCC; da presença de impurezas e elementos de liga, os quais formam sítios de nucleação e aprisionamento de H₂; e também das condições de soldagem, em particular a taxa de solidificação. De fato, é esperado que um aumento na taxa de solidificação (como um aumento na velocidade de soldagem para a mesma corrente média por exemplo) irá facilitar o aprisionamento e a formação dos poros no cordão solidificado.

2.6 Propriedades físicas de misturas com hidrogênio

As propriedades físicas do gás influenciam decisivamente nas características do arco elétrico. Um importante parâmetro do gás é a energia de ionização. O valor da energia de ionização do He é 24,6 eV, consideravelmente maior do que o Ar com 15,7 eV. Já o hidrogênio possui energia de ionização de 13,6 eV bem próxima ao valor do Ar.

A Figura 4 mostra dois exemplos de gráficos da condutividade térmica em função da temperatura para diferentes gases. No gráfico da esquerda pode-se ver os valores para os principais gases utilizados nos processos de soldagem à arco. É possível destacar a maior condutividade térmica do He em comparação com o Ar, e também o elevado pico de condutividade térmica para o H₂ na faixa compreendida entre 3000 e 4500 K. O gráfico da direita mostra a condutividade térmica total em função da temperatura para algumas misturas Ar-H₂. É possível notar que a condutividade térmica do hidrogênio é bastante elevada em comparação com a do argônio e possui um pico proeminente (devido à dissociação) em aproximadamente 4000 K e um pico menos pronunciado (devido à ionização) em aproximadamente 14000 K.[7]

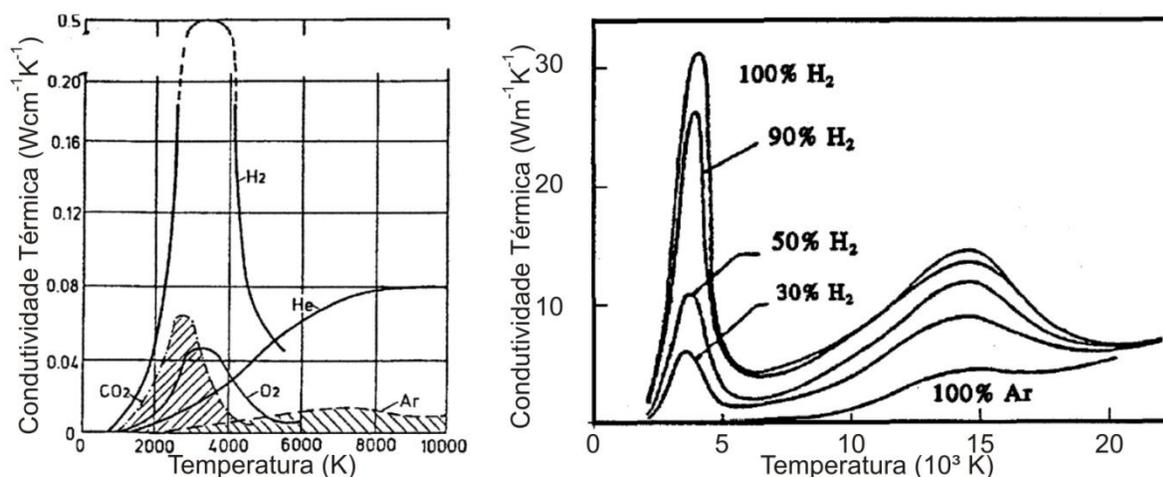


Figura 4 - Condutividade dos gases em função da temperatura (esquerda). [8] Condutividade térmica de algumas misturas argônio hidrogênio em função da temperatura (direita). [7]

2.7 Influência da adição de hidrogênio no gás de proteção do arco

A adição de percentuais de hidrogênio ao argônio no gás de proteção do processo TIG causa aumento da tensão do arco e aumento na quantidade de material fundido para mesma corrente média [7-8]. A Figura 5 mostra: a variação da tensão do arco em diferentes correntes para o Ar puro e misturas Ar-H₂ (esquerda) e o resultado da medição da área fundida na secção transversal para diferentes teores de H₂ no gás de proteção (direita). As diferenças na tensão do arco devido a mudanças na composição do gás de proteção podem ser atribuídas a diferenças no potencial de ionização primário do gás. Entretanto, conforme foi citado anteriormente, não existe diferenças

significativas entre o potencial de ionização primário do argônio e o hidrogênio. Segundo [7], a diferença que é observada na tensão do arco no presente caso entre o arco com Ar puro e misturas Ar-H₂ ocorre devido à grande diferença da condução de calor de ambos os gases de proteção. Desde que mais energia é dispensada por unidade de tempo por condução térmica no caso do arco de Ar-H₂ do que no caso do arco de Ar puro, mais energia é requerida para manter uma determinada corrente no arco. Essa energia extra só pode ser fornecida pelo aumento da tensão do arco.

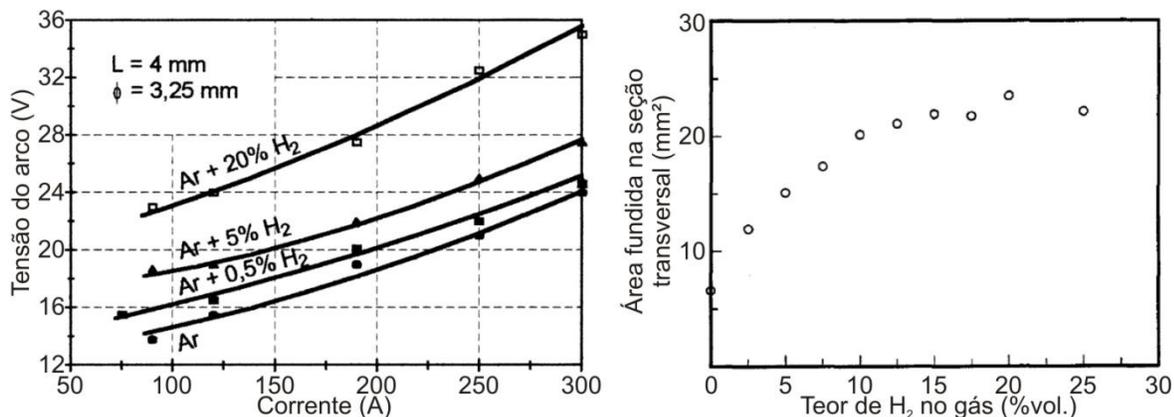


Figura 5 - Característica estática na soldagem TIG com diferentes gases de proteção (Distância eletrodo-peça = 4mm, eletrodo negativo) (esquerda) [8]. Área da seção transversal no ferro puro em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção (I:100 A, DEP 3 mm, Vs: 3 mm/s) (direita) [7].

A adição de hidrogênio ao argônio do gás de proteção no processo TIG também causa o aumento da eficiência de fusão do arco para a mesma corrente média em comparação ao Ar puro, como mostra a Figura 6. Segundo [7], o aumento observado na eficiência de fusão é consequência direta da contração da coluna do arco, e do aumento da condutividade térmica do gás de proteção com a adição de hidrogênio.

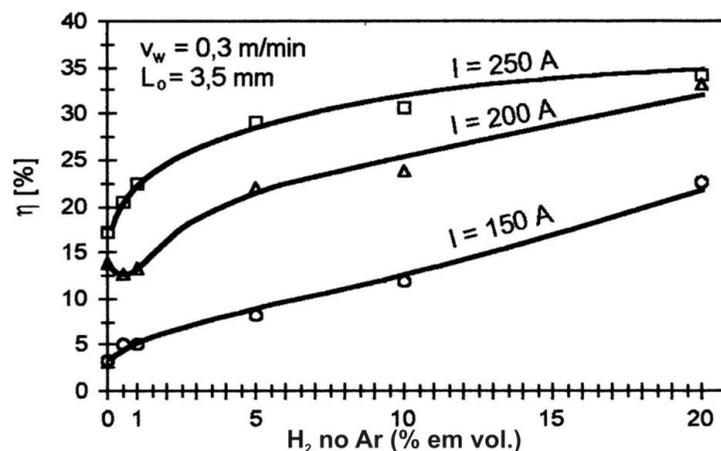


Figura 6 - Efeito da adição de Hidrogênio ao Argônio no gás de proteção, e da intensidade da corrente de soldagem, na eficiência de fusão para a soldagem TIG[8].

3. Objetivos e justificativas:

A motivação para realizar o presente estudo surgiu durante um trabalho realizado no LABSOLDA – UFSC, o qual visava o desenvolvimento de uma solução para aplicação industrial. O trabalho consistiu na soldagem de uma junta sobreposta de aço carbono de 3 mm de espessura. Tradicionalmente, essa junta é soldada utilizando o processo MIG/MAG convencional com velocidade de soldagem de aproximadamente 1,2 m/min. O desafio era realizar essa soldagem utilizando o processo TIG de maneira autógena, sem utilizar material de adição, para obter uma junta com qualidade e velocidade equivalente ao que estava sendo obtido com o processo MIG.

Com base em combinações de parâmetros específicos: ângulo de ataque da tocha de soldagem; posição do eletrodo em relação à junta; distância eletrodo-peça; afiação do eletrodo e principalmente gás de proteção, foi possível obter a soldagem da junta com boa qualidade com velocidade de até 1,5 m/min. A Figura 7 mostra o aspecto superficial e a seção transversal do cordão de solda obtido. O uso de misturas Ar-H₂ com teor de 15% de hidrogênio foi o fator chave que possibilitou obtenção da velocidade de soldagem elevada sem o aparecimento de *humping*.

Não foram encontrados trabalhos que discutam a soldagem de elevada produtividade para o caso de misturas Ar-H₂. Conforme foi mostrado anteriormente, as teorias que tratam dos defeitos da soldagem de elevada produtividade têm como base a pressão do arco como fator chave para formação dos defeitos, e essas teorias foram construídas com base em comparações de soldagens realizadas com hélio puro e argônio puro somente. De acordo com essas teorias, a menor pressão do arco no caso do He seria o motivo para a maior velocidade em comparação com o Ar. Porém, para o presente exemplo prático, onde o uso de misturas Ar-H₂ resultou em velocidade de soldagem muito superior ao Ar puro, a diferença de velocidade não pode ser explicada por uma suposta diferença de pressão do arco, já que não existem indícios que a pressão do arco poderia sofrer alguma diminuição devido à adição de uma pequena fração de hidrogênio ao argônio.

Diante dessa falta de informação da literatura corrente sobre o aparecimento de defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade utilizando misturas Ar-H₂, decidiu-se realizar o presente trabalho científico cujo principal objetivo consiste em tentar fornecer novas informações e proporcionar subsídios para uma melhor compreensão dos fenômenos associados ao aparecimento de defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade.

Para que fosse possível uma comparação do comportamento do arco nas diferentes situações, foram realizadas soldagens utilizando Ar puro, He puro e misturas Ar-H₂.

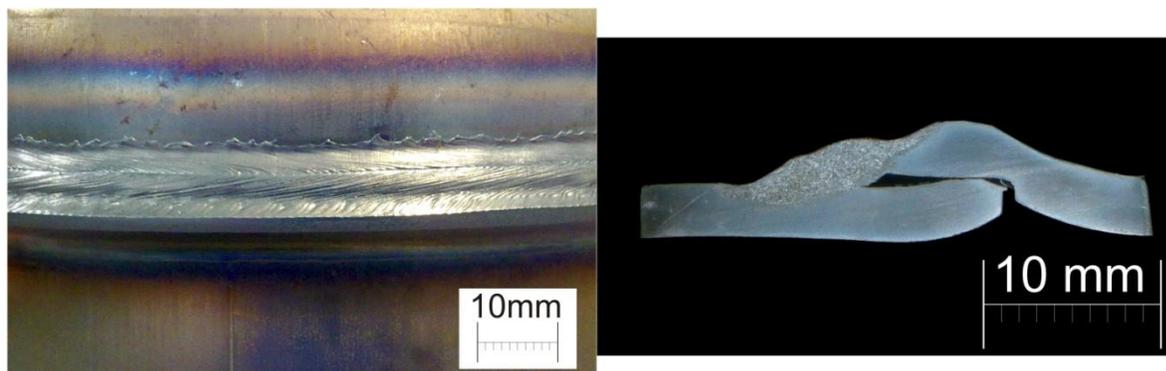


Figura 7 – Cordão soldado com processo TIG sem material de adição: aspecto superficial (esquerda). Seção transversal (direita). Junta sobreposta, aço carbono 3 mm espessura. Velocidade de soldagem: 1,5 m/min.

4. Equipamentos, Materiais e Metodologia

4.1 Ensaios de soldagem

Os ensaios de soldagem consistiram em realizar cordões sobre chapas. A fonte de soldagem utilizada foi a “IMC Digitec 800”, fonte multi-processo micro-processada, transistorizada, chaveada no secundário, com 16 kVA de potência e capacidade de corrente de até 800 A. Em todas as soldagens foi utilizada uma tocha TIG comercial refrigerada à água com capacidade nominal de 500 A. Os ensaios foram realizados com eletrodos de tungstênio EWTh-2 de 3,2 mm de diâmetro e afiação com ângulo de aproximadamente 90°. Todas as soldagens foram realizadas com distância eletrodo-peça de 3,0 mm e tocha de soldagem posicionada com o eletrodo perpendicular à superfície da peça. As vazões de gás foram reguladas com aproximadamente 15 l/min medidos na ponta da tocha de soldagem com um fluxímetro. As soldagens foram realizadas em chapas de aço carbono SAE 1020 com dimensões 200 mm x 73 mm x 9,5 mm.

A movimentação da tocha de soldagem foi realizada utilizando um robô de soldagem de seis eixos, e a velocidade utilizada nos ensaios foi 5 mm/s em todos os casos. As correntes testadas foram 200 A, 300 A e 400 A. Os gases testados foram argônio puro, hélio puro, e misturas Ar-H₂ com 5, 10 e 15% em volume molar de hidrogênio. Os gases puros foram de padrão comercial. Os cilindros das misturas Ar-H₂ foram encomendados como misturas para padrão de calibração, fornecidos com certificado de análise.

4.2 Aquisição dos sinais de corrente e tensão

Os sinais de corrente e tensão foram medidos utilizando o sistema de aquisição de sinais “IMC SAP 4.0”. Este sistema permite realizar aquisição dos sinais de corrente e tensão com frequência de 5 kHz. Entre outras opções, o software permite calcular as médias de corrente e tensão selecionando intervalos do tempo de aquisição.

4.3 Medição da área fundida

Para medição da área fundida, cada corpo de prova soldado foi cortado transversalmente, em duas seções diferentes, à 100 mm, e à 150 mm de distância do início da soldagem. Cada uma das seções retiradas, foi embutida em resina, e preparada metalograficamente, utilizando lixas grão 100-1200, e polimento com suspensão de alumina 1 μm . As amostras foram atacadas quimicamente para revelar a área fundida utilizando reagente composto por: 20 g Iodo sublimado, 40 g Iodeto de Potássio e 200 g de água destilada.

Após ataque, as amostras foram fotografadas, e a área do cordão foi medida utilizando o software de análise de imagens “UTHSCSA Image Tool v3.0”. Este software permite realizar a medição de áreas selecionadas em imagens, sendo necessário realizar para cada imagem uma calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração foi feita utilizando como base a espessura da chapa.

4.4 Cálculo da quantidade de material fundido por hora

O cálculo da quantidade de material fundido por hora foi realizado pela equação 1:

$$MR = A_m \rho v 3600 \quad (1)$$

Onde: MR = Quantidade de material fundido, em kg/h; A_m = Área fundida medida na seção transversal, em mm^2 ; ρ = Massa específica do aço, em kg/mm^3 e v = Velocidade de soldagem, em mm/s . A massa específica do aço foi considerada $7,85 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/\text{mm}^3$ nos cálculos do presente trabalho.

4.5 Cálculo da eficiência de fusão

Somente parte da energia fornecida pela fonte de soldagem consegue de fato ser utilizada para fusão da peça. A maior parte da energia é perdida de várias maneiras como: aquecimento do eletrodo, tocha e bocal, radiação eletromagnética e calor dissipado pelo corpo de prova. O cálculo da eficiência de fusão dos processos de soldagem normalmente é baseado na medição da zona fundida do cordão. Calcula-se então a energia necessária para aquecer e fundir o volume de metal medido, e divide-se pela energia total fornecida pela fonte de soldagem. O resultado dessa divisão é o que se considera eficiência de fusão.

A equação 2 mostra o cálculo da eficiência de fusão:

$$f_2 = \frac{Q A_m v}{VI} \quad (2)$$

Onde: f_2 = Eficiência de fusão; Q = Entalpia de fusão, em J/mm^3 . É a quantidade de calor requerido para elevar a temperatura do metal sólido até a temperatura de fusão e para converter esse volume do estado sólido para o estado líquido; A_m = Área fundida da seção transversal, em mm^2 ; v = Velocidade da fonte calorífica, em mm/s ; V = Tensão do arco, em V e I = Corrente de soldagem, em A . Segundo [9], considera-se $10,5 \text{ J}/\text{mm}^3$ como o valor aproximado para entalpia de fusão do aço, e esse foi o valor utilizado para o cálculo da eficiência de fusão.

5. Resultados e discussões

5.1 Resultados obtidos

Os ensaios com argônio puro no gás de proteção mostraram a forte tendência de formação de *humping* com Ar puro, mesmo com velocidade de soldagem de 5 mm/s , que é relativamente baixa. Os ensaios realizados no presente trabalho foram planejados com essa velocidade de soldagem baixa com objetivo de obter cordões contínuos que possibilitassem a medição e análise da área fundida. Porém, para o caso do Ar puro, obteve-se o cordão contínuo somente na corrente de 200 A. Para a corrente de 300 A já ocorreu formação de defeitos em cerca de metade do cordão, e com 400 A de corrente, ocorreu formação de defeitos em todo o cordão.

Para o caso dos ensaios realizados com He, não ocorreu a formação dos defeitos em nenhuma das correntes testadas. Esses resultados estão de acordo com os resultados de [4], mostrando que a utilização de hélio nos gás de proteção no processo TIG resulta em maior velocidade limite para aparecimento de defeitos em comparação com o argônio puro, considerando a mesma corrente média e distância eletrodo-peça.

Os ensaios realizados com as mistura Ar-H₂ mostraram que a adição do hidrogênio ao argônio resultou em um melhor desempenho em relação à formação de *humping* em comparação com o Ar puro. Para o caso da mistura Ar+5%H₂, no cordão soldado com 300 A não ocorreu a formação de *humping*. No ensaio com 400 A ficou nítido uma grande instabilidade durante a soldagem, sendo que a poça de fusão formava uma cratera que quase resultava em *humping*, porém, o metal líquido ainda conseguiu preencher as crateras e formar o cordão contínuo antes da solidificação completa, mas o cordão ficou com aspecto escamado devido a essas instabilidades. Os ensaios realizados com as misturas com as mistura Ar+10%H₂ e Ar+15%H₂ apresentaram cordões sem aparecimento de defeitos em todas as correntes testadas. Na mistura Ar+15%H₂ ocorreu um forte aparecimento de porosidade aberta na superfície do cordão.

A Figura 8 mostra as seções transversais cortadas a 150 mm do início de cada cordão soldado.

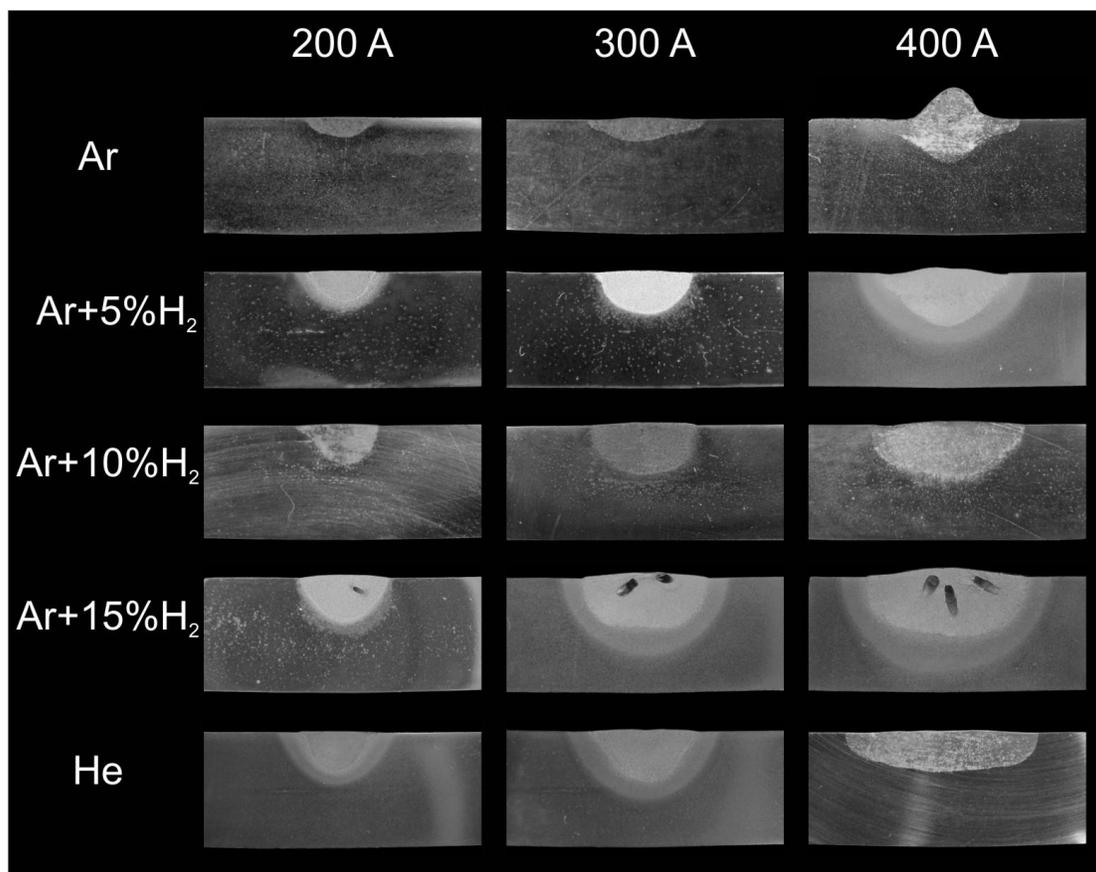


Figura 8 - Seção transversal dos cordões cortados a 150 mm de distância do início da solda. Vs: 30 cm/min. DEP: 3 mm. Eletrodo 3,2 mm diâmetro com afiação em 90°.

A Figura 9 (esquerda) mostra a quantidade de metal fundido em kg/h calculado com a Equação 1 a partir da média da área da seção transversal de cada cordão. É possível verificar que para a mesma corrente média o hélio funde uma quantidade maior de material em comparação com o argônio puro. Nas misturas Ar-H₂, conforme o teor de hidrogênio foi aumentado, aumentou-se fortemente a quantidade de metal fundido para a mesma corrente média, sendo que para a mistura com maior teor de H₂ a quantidade de metal fundido foi consideravelmente maior do que utilizando He puro, e cerca de 2,5 vezes maior do que utilizando Ar puro.

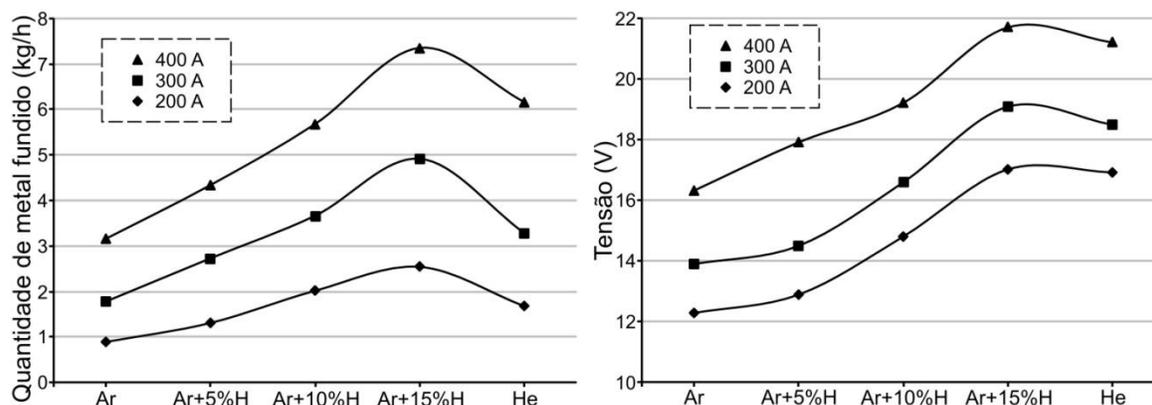


Figura 9 - Quantidade de metal fundido para os diferentes gases (esquerda). Tensão do arco para os diferentes gases (direita).

A Figura 9 (direita) mostra a tensão média para os diferentes gases testados com correntes de 200 A, 300 A, e 400 A. Conforme já era esperado devido à diferença na energia de ionização dos dois gases, o arco com He apresentou tensão consideravelmente maior do que o arco com Ar para mesma distância eletrodo-peça e mesma corrente média. Essa diferença foi superior a 4 V em todas as correntes testadas. Os ensaios com as misturas Ar-H₂ confirmaram a mesma tendência apresentada nos trabalhos de [7-8], sendo que a tensão do arco foi proporcionalmente maior conforme era maior o teor de H₂ presente no gás de proteção. A tensão do arco da mistura Ar+15%H₂ apresentou valores próximos a tensão do arco com He puro considerando as mesmas distância eletrodo-peça e corrente média.

A Figura 10 mostra a média da eficiência de fusão calculada com a Equação 2 para cada corrente testada. Pode-se verificar que a adição de H₂ ao Ar no gás de proteção resultou em um forte aumento da eficiência de fusão em comparação com o Ar puro, concordando com os resultados de [7-8]. Nota-se também que as misturas Ar-H₂ com teores de 10% e 15% de H₂ resultaram em maior eficiência de fusão do que o He.

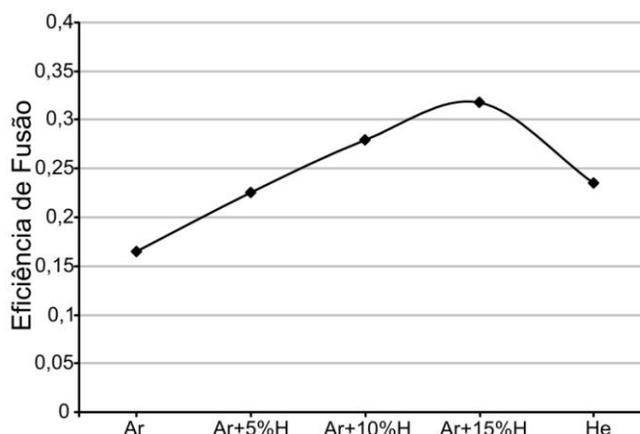


Figura 10 - Média da eficiência de fusão calculada para diferentes misturas gasosas.

5.2 Análise integrada dos resultados

Inicialmente, destaca-se que a adição de frações de H₂ ao Ar no gás de proteção aumentou a velocidade limite para surgimento de defeitos em comparação com o Ar puro para a mesma corrente média. Não foram encontradas publicações que mostrem que a adição de H₂ ao Ar causa diminuição da pressão do arco. Então esses resultados não podem ser explicados pela teoria proposta por [4-6], na qual a diferença na velocidade limite para surgimento de defeitos entre He e Ar é decorrente da menor pressão do arco para o caso do He.

Os resultados encontrados no presente trabalho, mostraram que para a mesma corrente média a tensão do arco e a quantidade de metal fundido pelo arco com He são muito maiores do que para o arco com Ar. Essa maior quantidade de metal fundido modifica totalmente o tamanho e a dinâmica de solidificação da poça de fusão. Os trabalhos [1-6] que tratam dos defeitos da soldagem de elevada produtividade para o processo TIG ignoram totalmente essas diferenças, e focam suas análises somente na diferença de pressão entre os arcos com Ar e He. Essa diferença na quantidade de metal fundido entre o arco com Ar e o arco He para mesma corrente média, por si só,

independentemente da pressão do arco, já seria um ponto favorável para obtenção de maior velocidade limite para surgimento de defeitos no caso do He, pois, considerando a explicação do item 2.2, uma maior quantidade de metal líquido na poça de fusão retardaria uma possível solidificação prematura da região de cratera, postergando o surgimento dos defeitos. Evidentemente que a diferença de pressão entre os arcos com He e com Ar pode também exercer um papel importante, e é de se esperar que a maior pressão do arco para o caso do Ar realmente tenha a tendência de tornar prematuro o processo de formação do *humping*. Dificilmente será possível determinar qual dos fatores, a pressão do arco ou a quantidade de metal fundido na poça de fusão, tem maior influência para a formação de defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade já que o resultado final da soldagem é uma combinação dos dois efeitos, e também não é esse o objetivo do presente trabalho. Porém ficou claro que a considerável diferença na quantidade de metal fundido entre o Ar e He para mesma corrente média tem papel significativo no formato da poça de fusão e conseqüentemente no surgimento de defeitos, e por isso não pode ser ignorado como ocorreu nos trabalhos encontrados. Além disso, os resultados dos ensaios de [4] mostram que a diminuição da distância eletrodo-peça velocidade limite para surgimento de defeitos aumenta com a diminuição da distância eletrodo-peça, enquanto a força total do arco também aumenta com a diminuição da distância eletrodo-peça.

Os resultados dos ensaios com as misturas Ar-H₂ fornecem subsídios para a explicação de que a quantidade de material fundido tem papel decisivo na velocidade limite para surgimento dos defeitos na soldagem TIG de elevada produtividade. Partindo do princípio de que pequenas frações de H₂ no Ar não diminuem a pressão do arco agindo na poça de fusão, a maior velocidade limite para aparecimento de defeitos que se obtém com as misturas Ar-H₂ é resultado direto da maior quantidade de material fundido na poça de fusão. Essa maior quantidade de metal fundido para as misturas Ar-H₂ em comparação com a quantidade de metal fundido com Ar puro, retarda o surgimento do *humping* para o caso das misturas Ar-H₂.

Considerando os resultados obtidos, principalmente com relação à elevada eficiência de fusão, a utilização de misturas Ar-H₂ na soldagem TIG de elevada produtividade aparece como uma importante alternativa tecnológica para obter maior velocidade de soldagem. Porém, a aplicação dessas misturas fica restrita aos casos onde a utilização do H₂ não cause problemas. Por exemplo, a utilização dessas misturas somente é possível em aços que não apresentem susceptibilidade à trincas induzidas por hidrogênio. Outra questão importante é a ocorrência de porosidade devido à utilização de H₂ na mistura gasosa, foi possível verificar elevada formação de porosidade nos ensaios de cordão sobre chapa com a mistura Ar+15%H₂, enquanto que no caso da soldagem de união em junta sobreposta usando chapas de 3 mm de espessura não ocorreu porosidade. Essa diferença nas duas situações utilizando a mesma mistura gasosa, pode ser explicada conforme [7], devido a uma possível diferença de composição química dos aços utilizados em cada caso e devido à diferentes velocidades de solidificação. Além disso, o formato do cordão certamente influenciou na formação de porosidade no metal solidificado sendo que é possível aceitar que o gás aprisionado no metal tem maior facilidade para deixar o metal líquido no caso da junta sobreposta cujo cordão tem uma relação largura pela profundidade muito maior do que no caso da soldagem cordão sobre chapa onde essa relação é bem menor.

6. Conclusões

Com base nos ensaios realizados no presente trabalho, em conjunto com o estudo da literatura corrente sobre o assunto é possível concluir que:

Foi possível verificar que o arco com o processo TIG utilizando como gás de proteção misturas Ar-H₂ proporciona eficiência de fusão muito mais elevada do que para o caso do Ar puro, e inclusive mais elevada do que o He dependendo do teor de H₂. Este aumento da eficiência de fusão pode ser atribuído à maior condutividade térmica do hidrogênio, aumento da tensão do arco e da potência total do processo, e também devido ao efeito de constrição do arco causado pela adição deste elemento.

O uso de misturas Ar-H₂ no gás de proteção surge como uma importante alternativa para elevar a velocidade de soldagem no processo TIG. Foi possível verificar que a utilização destas misturas diminuiu de maneira acentuada a tendência de formação dos defeitos de soldagem tipo *humping* em comparação com o argônio puro. Considerando que a maior parte das aplicações tradicionais do processo TIG o gás utilizado é o argônio puro, existe então uma grande possibilidade de melhoria de produtividade por meio da utilização de frações de H₂ no gás de proteção.

Os trabalhos que tratam dos defeitos da soldagem TIG em aplicações de elevada produtividade dão destaque à pressão do arco como fator chave para ocorrência dos defeitos, porém, os resultados do presente trabalho mostram que a quantidade de metal fundido resultante da utilização de diferentes misturas gasosas também é um fator decisivo, no mínimo tão importante quanto a pressão do arco para ocorrência de descontinuidades do cordão de solda.

7. Bibliografia

- [1] MENDEZ, P. F. Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding. Massachusetts Institute of Technology. 1999.
- [2] MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. Penetration and defect formation in high-current arc welding. *Welding Journal*, p. 296-306, october 2003.
- [3] MENDEZ, P. F.; NIECE, K. L.; EAGAR, T. W. Humping Formation in High Current GTA Welding. International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II. Cincinnati, OH: 1999.
- [4] SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding. *Welding Journal*, jul. 1979. 212s-224s.
- [5] KUMAR, A.; DEBROY, T. Toward a Unified Model to Prevent Humping Defects in Gas Tungsten Arc Welding. *Welding Journal*, p. 292-304, December 2006.
- [6] SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. Humping mechanisms present in high speed welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, p. 572-579, 11(5) 2006.
- [7] HOOIJMANS, J. Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding. thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technol., 1994.
- [8] TUSEK, J.; SUBAN, M. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, n. 25, p. 369-376, 2000.
- [9] AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Handbook - Welding Science and Technology*. 9ª Edição. AWS, v. 1, 2001.